

# ゲイン極大化法による活性汚泥プロセスのDOプロフィール制御

㈱富士電機総合研究所 ○田沼良平, 佐々木康成  
富士電機製造株式会社 松永岩夫

## 1. まえがき

活性汚泥プロセスで広く採用されている押し出し流れ型エアレーションタンクでは、溶存酸素(DO)濃度は、タンク前半部で低く、処理が進むにつれて上昇する。このような流下方向へのDO濃度のプロフィールは、プロセスの状態を反映していることからその重要性が指摘されており、特にプロフィールの変曲点は処理がほぼ完了したことの目安になるとされている<sup>1)2)</sup>。筆者らは、微生物の酸素充足度(エアレーションタンク内に占めるDO律速領域の割合)が汚泥性状を良好に保つ上で重要であると考え、DOプロフィールとの関係について研究を進めてきた<sup>3)</sup>。ここで述べる制御法は、エアレーション空気量の変化に対するDO濃度変化が最大になるようにDO濃度を制御するものであり、DOプロフィールの変曲点を目的の場所に固定できるとともに、酸素充足度の制御にもつながる方法である。今回テストプラントで本法を実施し、良好な結果を得たのでここに報告する。

## 2. 実験方法

実験プラントは約10 m<sup>3</sup>/dの食堂廃水を処理する活性汚泥プロセスであり、概要をFig.1に示す。エアレーションタンクは4槽に分割されており、流入側から3番目の槽にDO計が設置してある。DO濃度信号はAD変換器を介してパーソナルコンピュータに入力され、制御演算により目標空気量が計算される。この値はDA変換され、空気量制御ループに設定値として入力される。空気量制御ループは、プロア、オリフィス式流量計、アナログ調節計、及びプロアの回転数を調節するためのインバータからなり、パーソナルコンピュータから目標空気量を受けて実際の空気量をその値に制御する。原水供給ポンプはインバータで回転数を調節できるようにしてある。今回の実験では、実際の下水処理場の負荷変動を模擬した流量パターンをパーソナルコンピュータで発生し、原水流量をこのパターンに従って変化させた。実験条件の概要をTable

1に示す。

## 3. 原理

この制御は、エアレーションタンクの目的の地点において、全空気流量Fの変化に対するDO濃度変化のゲインを最大にする。これは、エアレーション強度f(単位体積当たりの空気流量)がFに比例すると考えると、fとDO濃度間の静特性曲線(f-C曲線)の変曲点にDO濃度を制御することを意味する。この方法の原理を明らかにするために、f-C曲線と流下方向へのDOプロフィールとの関係を考える。タンク内の流動状態を押し出し流れと仮定すると、DO濃度C、基質濃度S、及びfの関係は次の偏微分方程式で記述できる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial S}{\partial l} - \frac{k_1 SC}{k_2 + C} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial l} + k_3 f (C_S - C) - \frac{C(k_4 S + k_5)}{k_2 + C} \quad (2)$$

ここで、uは流下速度、lはエアレーションタンク流入側からの距離、C<sub>S</sub>は飽和DO濃度、k<sub>1</sub>~k<sub>5</sub>は定数である。定常状態(∂S/∂t=0, ∂C/∂t=0)を考え

Table 1. Experimental conditions

Items	Range
Influent (m <sup>3</sup> /d)	0.6-10.0
Retention Time (h)	12
Organic Load (Kg/Kg-SS.h)	0.3-1.6
MLSS (g/m <sup>3</sup> )	1450-2410
Return Sludge (m <sup>3</sup> /d)	4.9
Temperature (C)	10.8-15.5

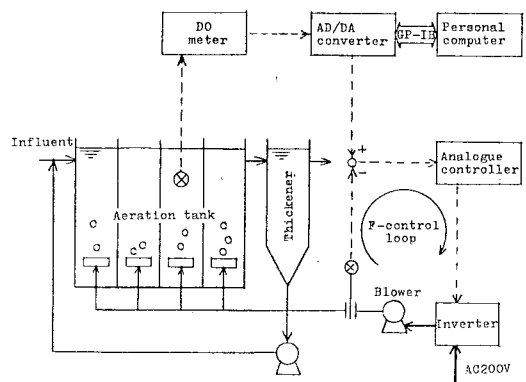


Fig. 1. Outline of the experimental plant

ると、式(1)、(2)は常微分方程式となり、この数値解を求めることにより  $C$  を  $f$  と  $1$  の関数として決定することができる。すなわち、 $1$ 、 $f$ 、 $C$  の関係は3次元空間における曲面 ( $1-f-C$  曲面) となり、これを透視図として描くと Fig. 2 のようになる。この曲面を  $f-C$  平面と平行な平面で切った切口が  $f-C$  曲線、 $C-1$  平面と平行な平面で切った切口が流下方向への  $DO$  プロフィールである。また  $f-C$  曲線の変曲点を結んだ線 ( $MG$  line) 及び、 $DO$  プロフィールの変曲点を結んだ線 ( $MS$  line) をそれぞれ実線と破線で示してある。この図からわかるとおり、 $DO$  プロフィールの変曲点は  $f-C$  曲線の変曲点とはほぼ一致する。このことは、目的の地点の  $DO$  濃度を本法で制御すると、処理の完了の目安となる  $DO$  プロフィールの変曲点をその地点に固定できることを意味する。

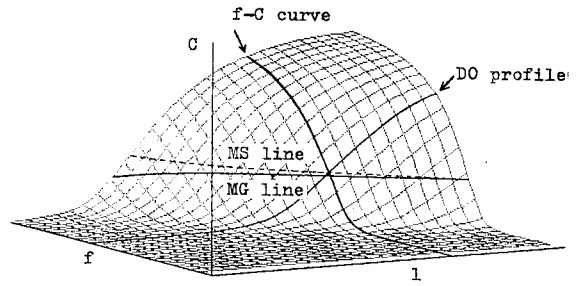


Fig. 2. Perspective view of  $1-f-C$  surface

次にこの制御法の持つもう一つの側面、酸素充足度との関係を説明する。エアレーションタンクの1地点での  $f$  と  $C$  の関係を考える場合、式(2)の右辺第1項は、第2、第3項に対して無視できるため、

$$\frac{dC_m}{dt} = k_3 f (C_s - C_m) - \frac{C_m(k_4 S_m + k_5)}{k_2 + C_m} \quad (3)$$

を得る。ここで、 $C_m$  及び  $S_m$  は、それぞれ測定点における  $S$  及び  $C$  である。また、右辺第2項は測定点における呼吸速度  $R_{rm}$  である。 $R_{rm}$  の変化は  $f$  を適当なきざみ幅で変化させながら  $DO$  プロフィールを計算する過程で求まる。Fig. 3 にはこのようにして求めた  $R_{rm}$  が  $C_m$  に対してプロットしてある。 $R_{rm}$  は低  $DO$  部で急に低下しており、この状態を  $DO$  律速状態と言う。また高  $DO$  側で  $R_{rm}$  が右下りになっているのは、 $f$  の増加に伴い  $S_m$  が減少するためである。この図を用いると定常状態 ( $dC_m/dt = 0$ ) における  $C_m$  は、直線  $y = k_3 f (C_s - C_m)$  と  $y = R_{rm}$  の交点から求まり、 $f$  の変化  $\Delta f$  に対する  $C_m$  の変化  $\Delta C_m$  も同様に図上で知ることができる。今、 $C_m$  が十分に高い状態から  $f$  を徐々に減少させる場合を考えると、図から明らかな様に、 $\Delta C_m/\Delta f$  は  $DO$  律速状態に入る直前に最大値を示すことがわかる。このことは、本制御を実施すると、エアレーションタンク前半に存在する  $DO$  律速領域 ( $O_2$  供給不足の領域) が制御点直前で終了することを意味する。すなわち、先に述べた酸素充足度を一定に制御できることになる。

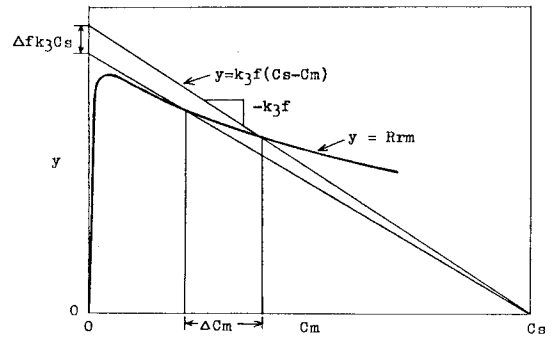


Fig. 3. Graphical solution of  $f-C_m$  gain

#### 4. MRAS によるゲイン極大化

$F$  と  $C_m$  の関係は近似的に1次遅れで表わすことができる。すなわち、

$$T \frac{dC_m}{dt} + C_m = aF + b \quad (4)$$

となる。ここで、 $T$  は1次遅れ時定数、 $a$  はゲイン、 $b$  は定数である。したがって、本制御は  $a$  を極大化する問題に帰着する。この目的のために筆者らはモデル規範適応システム (MRAS)<sup>4)</sup> によるパラメータ同定法を応用した。MRAS は実際のプロセスとその動特性を近似するモデルからなり、プロセス出力とモデル出力が一致するようにモデルのパラメータ値を調整する。MRAS をゲイン極大化に应用到するに当たり、筆者らは  $C_m$  の移動平均  $\bar{C}_m$  を基準値とし、 $C_m < \bar{C}_m$  の時の  $a(a_1)$  と  $C_m > \bar{C}_m$  の時の  $a(a_2)$  を別々に求めることを考えた (実際には  $C_m$  の平滑化信号とその移動平均を用いている)。Fig. 4 は実験プラントで測定した  $C_m$  と  $F$  の関係であ

り、 $f \propto F$  と考えるとこれを  $f-c$  曲線と見なしてよい。この図に示したように、 $a_1$  と  $a_2$  を別々に求めるということは、曲線を基準点  $P$  を折点とする折線で近似することに等しい。したがって、 $a_1 = a_2$  となるように  $C_m$  のレベルを調節することによりゲインが極大値に達し、本制御の目的が達成される。

Fig. 5 は制御演算のブロック線図である。この制御は主として DO 制御ループと  $C_r$  ( $C_m$  の設定値) 調節部の 2 つから構成されている。このうち DO 制御ループは PI 動作を主制御として  $C_m$  を  $C_r$  に制御する。なお今回の実験では負荷の急変に対応するため、流入水量  $Q$  によるフィードフォワード制御を併用している。制御演算で求めた空気量基準値  $F_b$  にパラメータ同定過程をスムーズにするためのテストシグナルを加え、これを一定時間ホールドしたものが実際の空気量  $F$  となる。

パラメータ同定には、いわゆる Washout filter<sup>4)</sup> によりプロセス入力  $F$  及び出力  $C_m$  から直流成分を除去した信号（それぞれ、 $u$  及び  $y$ ）を用いる。 $u$  は適応モデルに入力され、モデル出力  $x_m$  と  $y$  の差  $e$  がなくなるように適応機構 (AM1, AM2, AM3) が作動する。このうち AM3 は時定数  $T$  を同定するためのものであり、適応則は、

$$T = T_0 - k_T \int_0^t e \dot{x}_m dt \quad (5)$$

である。<sup>4)</sup>ここで  $T_0$  は  $T$  の初期値、 $k_T$  は適応ゲインである。また AM1 と AM2 は、それぞれ  $a_1$  と  $a_2$  を同定するもので適応則は、

$$a_1 = a_{10} + k_a \int_0^t e u dt \quad (6)$$

$$a_2 = a_{20} + k_a \int_0^t e u dt \quad (7)$$

である。<sup>4)</sup>ここで、 $a_{10}$  と  $a_{20}$  はそれぞれ  $a_1$  及び  $a_2$  の初期値、 $k_a$  は適応ゲインである。AM1 と AM2 は、 $C_m$  をフィルタリングした信号  $C_f$  とその移動平均  $\bar{C}_f$  の大小関係により、一方だけが作動し、適応モデルのゲイン  $a$  としては作動している方の適応機構の出力 ( $a_1$  又は  $a_2$ ) が採用される。このようにして  $a_1$  と  $a_2$  が求まると  $a_1 = a_2$  となる方向に積分動作で  $C_r$  が操作され、 $C_m$  は  $C_r$  に追従する形で変曲点へと移動して行く。

## 5. 制御結果

Fig. 6 は制御実験のトレンドグラフである。制御は  $C_r = 0.5 \text{ mg/l}$  でスタートし、約 120 時間実施した。制御開始直後  $C_r$  は若干減少するが、5~6 時間後には上昇に転じ、約 40 時間ではほぼ一定値に達している。その後は  $C_r$  は  $1.5 \sim 2 \text{ mg/l}$  に維持され、 $C_m$  は  $C_r$  を中心に約  $\pm 1 \text{ mg/l}$  の範囲に制御されている。一定値に達した

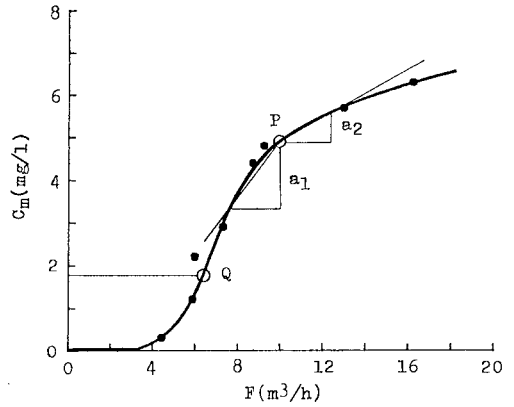


Fig. 4. Observed  $f-c$  curve

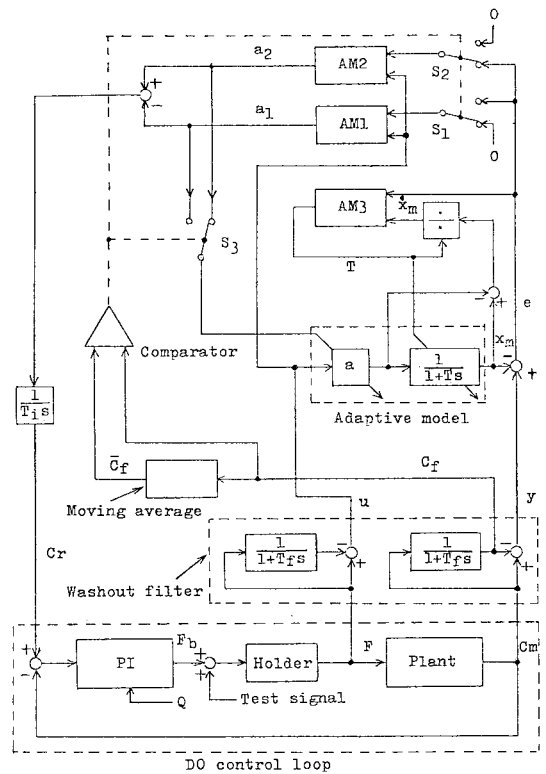


Fig. 5. Block diagram of the control

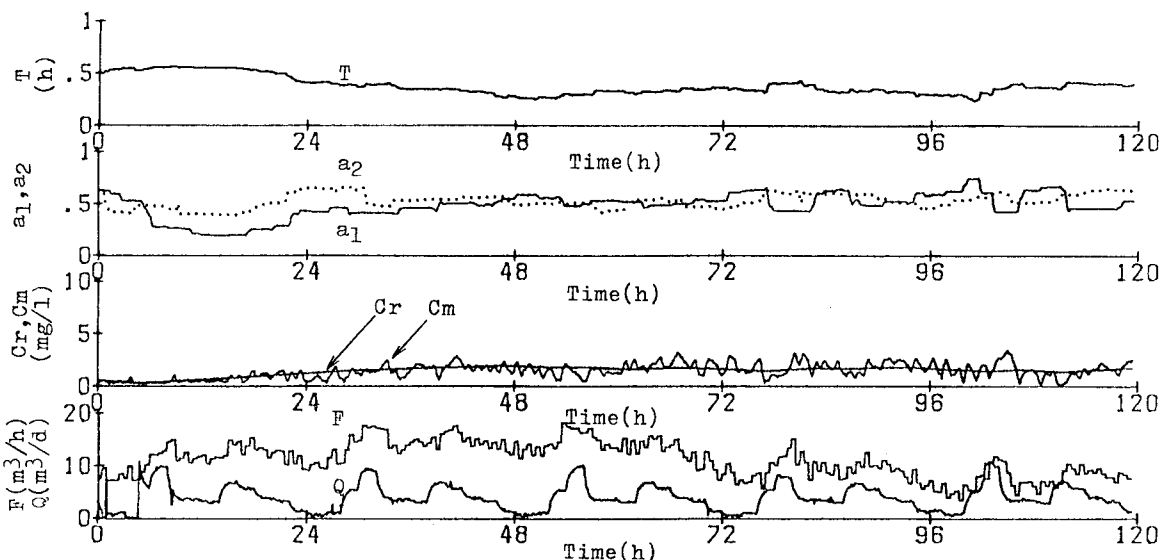


Fig. 6. Trend graph of the control

後の  $O_r$  の値と、Fig. 4 の変曲点  $Q$  の DO 値は良く一致しており、変曲点制御の目的を達している。MRAAS は安定して作動しており、 $O_r$  が低い時は  $a_1 < a_2$  であったものが、変曲点に近付くにつれて両者が歩み寄って行く様子がよくわかる。

一方、比較のため同様の負荷変動下で一定空気量で運転したところ、 $C_m$  は  $0 \sim 6 \text{ mg/l}$  の範囲で変動した。またピーク負荷時に  $C_m = 1 \text{ mg/l}$  を保証できるような一定空気量での運転と、DO 制御時とでプロアの消費電力を比較することにより、制御により約 17% の電力節減が可能であることがわかった。

#### 6. あとがき

今回報告した制御法によれば、1つのセンサで DO プロフィールの変曲点の位置を制御することができる。その結果、エアレーションタンクの目的の場所で処理が終り、酸素充足度が一定に保たれた状態を作ることが可能になる。すなわち、この方法はタンク内の生物化学反応の特性を利用して DO 設定値を自動調整するものであり、結果としての空気量は、プロセスの状態を良好に保つための限界空気量と考えて良い。さらに実用面では、DO センサの特性が多少変化しても制御結果に影響しない事も大きな利点である。今後は実プラントでの制御を試みるとともに、硝化プロセスへの適用、筆者らが進めている排ガスによる DO 制御法への応用等も検討する予定である。

#### <参考文献>

- 1) G. Olsson & J.F. Andrews, The dissolved oxygen profile — A valuable tool for control of the activated sludge process, *Water Research*, 12, 11, 985—1004 (1978)
- 2) G. Olsson & J.F. Andrews, Dissolved oxygen control in the activated sludge process, *Wat. Sci. Tech.*, 13, Munich, 341—347 (1981)
- 3) 田沼, 佐々木, 松永, 適応呼吸速度モデルによる活性汚泥プロセスの限界空気量制御, 第4回適応制御シンポジウム資料, 計測自動制御学会, 59—62 (1984)
- 4) Y. D. Landau, Adaptive control — The model reference approach, Marcel Dekker (1979)